

圧電型と静電型加速度センサを組み合わせた 位置推定手法の実装と評価

植田 貴至^{†1} 藤田 直生^{†1} 寺田 努^{†1} 塚本 昌彦^{†1}

近年、ユビキタスコンピューティング環境において、利用者の位置情報に基づいたサービスの提供が注目されている。位置依存サービスを提供するには、位置取得が必要となるが、一般に用いられている GPS(Global Positioning System) は屋内で利用できないため、屋内・屋外に関わらず位置情報を精度良く取得する手法が求められている。そこで本研究では、慣性センサである加速度センサを人に取り付け、位置情報を取得する慣性航法システムに着目し、特性の異なる 2 つの加速度センサを組み合わせることで、従来より計算量が少なく精度の良い慣性航法を実現する手法を提案する。評価実験により、2 つの加速度センサ情報と簡単なフィルタ処理で、位置推定精度が向上し提案手法が有効であることを確認した。

A Location Estimation Method by Integrative Use of Piezoelectric and Electrostatic Acceleration Sensors

Atsushi Ueda^{†1} Naotaka Fujita^{†1} Tsutomu Terada^{†1}
Masahiko Tsukamoto^{†1}

In recent years, context aware services, especially based on the position of user, attract a great deal of attention in ubiquitous computing environment. Although the position is most important information to offer such services, previous approaches such as the use of GPS(Global Positioning System) have several problems in environmental restrictions and their poor accuracy. Therefore in this study, we focused on the inertial navigation whose a user wears inertial sensors such as acceleration sensors and acquires the position. We propose to combine two different acceleration sensors that are electrostatic and piezoelectric for realizing low cost and accurate the inertial navigation. We confirmed the effectiveness of the proposal approach by the evaluation experiment.

1 はじめに

近年、利用者の状況やその変化を認識し、状況に応じたサービスを提供することで、より良い環境を作り出すコンテキストウェアサービスが注目されている。コンテキストウェアサービスは、利用者の状況を認識して提供するサービスであり、行動認識や位置情報取得の技術を用いて提供される。このようなサービスを提供するためには、利用者の行動を正確に認識する必要がある。しかし人の行動は場所に大きく依存していることから、中でも利用者の位置情報を取得することが重要であるといえる。現在提供されているサービスの多くが位置情報の

取得に GPS を用いており、これまでに人や車のナビゲーションの他、現在位置に基づくコンテンツ提供や、ジョギングやウォーキングの支援サービスが登場している。しかし、GPS を用いたサービスは、GPS 信号を受信できない屋内で利用することはできない。そのため、屋内・屋外問わず位置情報を取得できる手法が求められている。

屋内・屋外問わず位置推定が可能な主な手法として、外部環境に依存せず利用者の動きから位置を推定する慣性航法と、外部環境に依存する無線 LAN やマーカなどを用いる手法がある。慣性航法は、単独で位置推定を行える特長があり、慣性航法システムを利用者に持たせるだけでサービスを提供できる。無線 LAN を用いた手法は、設置された無線 LAN

^{†1} 神戸大学大学院 工学研究科

のアクセスポイントと利用者間の電波強度を測定することにより位置情報を測定する。この手法では、距離と電波強度の関係が線形ではなく電波状況により精度が変化する問題や、設置されたアクセスポイントの位置情報に精度が依存する問題がある。しかし、すでに設置されている無線 LAN アクセスポイントからの電波強度を測定するだけで提供可能なことから、位置情報の取得が容易である利点がある。環境にマーカや発信機を取り付けることで利用者の位置情報を取得する手法は、サービスを提供するすべての空間に環境を構築しなければならず、構築のコストが高い問題があるが、位置情報取得精度が高い。本研究で取り組む慣性航法は、物理的な慣性の変化を捉えるセンサである加速度センサやジャイロセンサを搭載した端末を用い、基準点からの相対的な移動距離を累積的に求める手法であるため、自律的に位置推定が可能である。しかし、累積的に移動距離を計算するため、センサのノイズや、重力加速度の影響により誤差が累積され、最終的な推定距離の誤差が大きくなる問題がある。累積的な誤差を減らし精度を良くする手法として、さまざまなフィルタ処理を用いた計算手法が提案されている。しかし、高度なフィルタ処理を導入すると計算量が多くなり、計算機のコストや消費電力が大きくなる。逆に、計算量を減らすと推定精度が悪くなることから、精度と計算量はトレードオフの関係になる。

これまでの慣性航法システムは、飛行機や車のナビゲーションに用いられてきたため、コストより精度が重視され、消費電力が問題視されたりすることも少なかった。しかし、コンテキストウェアサービスを提供する場においては、利用者に安価で小型の端末を提供してサービスを提供することが求められるため、精度を落とすことなく計算コストが低いシステムが求められる。

本研究では、計算量が少なく、精度の良い慣性航法を実現する方法として、静電容量型加速度センサと圧電型加速度センサという異なる検出原理による加速度センサを組み合わせた慣性航法を提案する。これにより、従来計算機で行ってきたフィルタ処理の一部をハードウェアで代替でき、計算量が削減されるため、安価で小型な慣性航法システムを実現できる。

以降、2章では関連研究について述べ、3章では本研究で提案するシステムの概要を示す。4章では

システムの設計と実装について説明し、5章で評価実験とその考察を行う。最後に6章でまとめと今後の研究課題について述べる。

2 関連研究

位置情報を取得する手法として、利用者自身が慣性センサを装着して慣性情報を用いる手法と、外部環境にマーカなどを取り付ける手法がある。以下、それぞれの研究について述べる。

2.1 慣性航法による位置推定

慣性航法は、加速度センサやジャイロセンサといった慣性センサを用いて移動距離を累積的に算出する手法である。加速度センサから移動距離を算出する場合、移動時に発生する加速度である動加速度を積分することで距離が求められる。飛行機などに搭載される慣性航法では、重力加速度に影響されない大型で高価な圧電型加速度センサが用いられてきた。しかし大型な加速度センサを用いると、人が持ち歩いて利用するのは困難である。近年の半導体技術の向上により、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用い IC の中に加速度センサを構築したものが安価で供給されるようになった。そのため、近年では MEMS 加速度センサを用いた小型な慣性航法システムを実現し、人の動きから位置推定を行う研究がある。しかし、現状では MEMS で実現される加速度センサは重力加速度を検出するため、移動距離を累積的に算出する上で、センサのノイズ除去とともに静加速度(重力加速度)と動加速度を精度よく切り分ける必要がある。そこでこれらの問題を踏まえて、これまでに慣性航法を応用して位置推定に用いるための様々な手法が提案されている。

上坂らは、慣性航法は積分による誤差が大きいため、加速度センサによる歩数計測を元に移動距離を求める手法を提案している¹⁾。加速度センサで歩行時の腕振り運動を解析し、特徴点を抽出することで歩数のカウントを行っており、歩数に関しては最大 2% の推定誤差に収まっている。しかし、歩幅は固定的に与えられた値を用いているため、ユーザによって推定移動距離にばらつきが出る。

興梠らは、腰部に装着された慣性センサと、頭部に装着された慣性ヘッドトラッカーとウェアラブルディスプレイ、カメラにより、歩行動作による相対移動の推定結果と、画像に基づく絶対位置推定を

カルマンフィルタの枠組で統合する手法を提案している²⁾。ウェアラブル AR システムとして実装し、動作の検出精度と位置推定精度を評価し、良好な結果を得ている。しかし、絶対位置推定にカルマンフィルタを用いているため、計算量が多く、ユーザが手軽にもつ小型な端末に搭載することは難しい。

佐川らは、足の爪先の加速度を計測することで歩行時の初速度を求め、足が設置するタイミングで歩行時の姿勢と移動速度を補正し、積分演算による蓄積誤差を軽減する手法提案している³⁾。室内での3次元歩行経路を平均10パーセント以下の誤差で推定することに成功している。

これらの手法は、加速度センサで検出した加速度の累積計算で、正確に人の移動距離を算出することが困難であると考えた上で、他の手法との組み合わせや、ユーザ毎の歩行の解析といった念入りなキャリブレーションを行っており、安価で小型なシステムでの実現は難しい。安価、小型で慣性航法システムを実現するために、負荷が小さく精度の良い慣性航法の計算手法が必要である。

2.2 外部環境を用いた位置推定手法

外部環境情報を用いた位置推定手法では、無線 LAN 通信を利用したものがある。河口らは、2005年7月に無線 LAN 位置推定ポータルサイト Locky.jp を立ち上げ、WiFi のアクセスポイントの電波情報と位置を関連付けたサービスの提供を開始した⁴⁾。ユーザは Locky.jp のサイトから Locky Stumbler というソフトウェアツールをダウンロードし、GPS を用いて位置を新たに記録する。LockyStumbler は画面上に現在受信している無線基地局の BSSID や電波強度等を表示する。同時に GPS から緯度・経度情報を取得し、基地局情報と共にログファイルとして保存する機能をもつ。このログファイルを Locky.jp サイトにアップロードすることにより、Locky.jp のデータベースの更新が行われる。類似するサービスには Place Engine⁵⁾がある。

また、環境に発信機やマーカなどのインフラを設置して位置推定をする手法がある^{6, 7)}。Priyantha らが提案した Cricket は RF 信号と超音波信号を送受信可能なセンサを天井に配置し、ユーザも同一のセンサを装着して利用するシステムである⁸⁾。環境中のセンサから発信する電波と超音波信号をユーザが装着するセンサで受信し、2つの信号の伝達時間差からユーザの位置を計測する。この手法は精度

よく位置を取得できる一方、電波を受信し続けるため消費電力が大きい。また環境インフラを利用した手法の推定精度は、総じて環境に設置するインフラの配置密度に依存しているため、利用範囲の拡大によって設置コストが増大してしまう問題がある。

3 提案手法

本研究では、2つの特性の違う加速度センサに着目し、小型で安価な慣性航法システムを構築する上で問題となる動加速度と静加速度の切り分けと加速度センサに含まれるノイズの処理を計算量が少ない手法で実現する。これにより、小型なマイコンで位置推定を行うことができ、安価で導入しやすいシステムを構築できる。現在提供されている安価な MEMS の加速度センサである静電容量型加速度センサは、静加速度と動加速度の両方を検出するため、人の動き以外に体の姿勢に影響した加速度を検出する。位置推定は動加速度のみを積分することで求めるため、人の姿勢に基づく加速度はノイズであり除去する必要がある。しかし、動加速度と静加速度が混合されているため分離することは難しい。そのため、2.1節で述べた様々な手法で人に特化した移動距離の推定を行う研究が行われている。本研究では、静電容量型加速度センサと特性の異なる圧電型加速度センサをフィルタと見なして利用することで、計算量が少なく精度の良い動加速度を検出する手法と提案する。圧電型加速度センサは、動加速度のみを検出することができる加速度センサであるが、小型で安価な物は精度が悪いという問題がある。そこで、圧電型加速度センサがある一定の閾値以上の加速度を検出した場合のみ人が動いたと考え、精度の良い静電容量型加速度センサを積分することで、移動距離の推定を行う。従来では、人が動いたことをフィルタ処理から計算により求めていたが、圧電型加速度センサを用いることで、動作検出のフィルタ処理が簡略化できる。以降、加速度データの具体的な計算手法を説明した後に、提案手法で用いる2つの加速度センサの特徴について述べる。

3.1 計算手法

筆者らが提案する2つの加速度センサを用いた距離算出の計算処理概要を図1に示す。

静電容量型加速度センサから、実際の移動距離を求める加速度成分をとりだし、圧電型加速度センサから、フィルタ処理のもととなる動きの検出を行う。

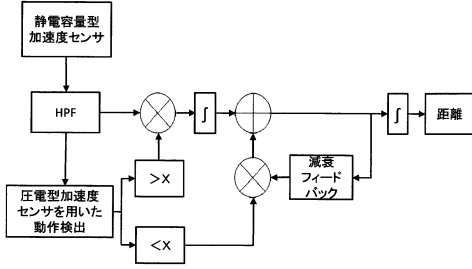


図 1: データ処理概要

Fig. 1: Calculation of the distance

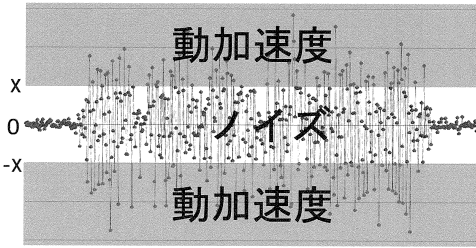


図 2: 閾値の設定

Fig. 2: Decision of threshold

最初に静電容量型加速度センサから A/D 変換により得られる離散的な加速度 a_e から、原点補正を行うため以下の式 (1) で示すハイパスフィルタで処理を行い原点補正と重力加速度の一部の除去が行われた加速度 a_{eh} を求める。

$$a_{eh} = a_e - \frac{\sum_{N} a_e}{N} \quad (1)$$

つぎに、図 2 に示すように圧電型加速度センサから得られる加速度 a_p の値に、 X の閾値を設定する。設定した閾値を動作検出のフィルタとして捉え、先に求めた a_{eh} へノッチフィルタとして組み合わせ、式 (2) で示す動加速度 a_a を求める。

$$a_a = \begin{cases} a_{eh} & (a_p \geq X) \\ 0 & (a_p < X) \end{cases} \quad (2)$$

最後に、動加速度 a_a を、式 (3) に示すように二重

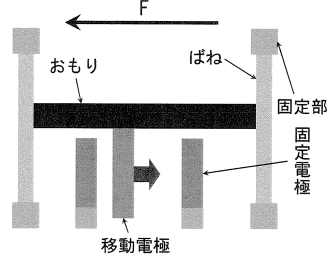


図 3: 静電容量型加速度センサ

Fig. 3: Electrostatic acceleration sensor

積分することで移動距離 $distance$ を求める。

$$distance = \iint a_a dt^2 \quad (3)$$

この計算は、加速度から移動距離を求める基本的な式であり、式 (2) の部分において他の研究では様々なフィルタ処理が用いられている。本研究では、フィルタ処理の部分で圧電型加速度センサを用いることで計算の簡略化を行っている。さらに加速度成分の残留誤差を減らすため、動加速度 a_a から累積的に速度 v_t を算出する上で、誤差が大きくなることを防ぐために任意の減衰係数 F_a を決め、式 (4) に示す減衰フィードバックを導入する。

$$v_t = \begin{cases} v_{t-1} - \frac{v_{t-1}}{F_a} & (a_a = 0) \\ v_{t-1} + \int a_a dt & (a_a \neq 0) \end{cases} \quad (4)$$

本研究では、以上のような計算処理で動加速度の検出精度を高め、積分計算に反映させることで慣性航法の精度を向上させる。

3.2 加速度センサ

提案手法で使用する静電容量型と圧電型、2種類の加速度センサの特徴について説明する。

3.2.1 静電容量型加速度センサ

静電容量型加速度センサは、加速度軸に対して垂直にもうけられた 2 点の固定電極と、中央に配置した移動電極間の静電容量の変化から、加速度を検出するセンサである。この静電容量型加速度センサの内部構造を、図 3 に示す。図 3 において、加速度 F が矢印の方向にかかることで、おもりに慣性力が加わり、移動電極の位置が矢印の方向に移動する。移動電極と固定電極の間には定常電圧がかかっており、電極間の距離が変化することで静電容量も変化

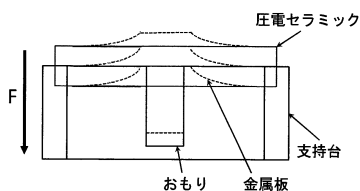


図 4: 圧電型加速度センサ
Fig. 4: Piezoelectric acceleration sensor

し、この変化量により加速度を検出する。そのため、静電容量型加速度センサは定常状態でも加速度の検出を行うことができ、0Hzの静加速度から数百Hzの動加速度まで測定可能である。また近年、MEMS技術により安価で小型、低消費電力の3軸加速度センサが実装可能になると共に感度、精度も高くなっている。そのため静電容量型加速度センサは、小型で安価な慣性航法システムを開発する際に、適したセンサであると考えられる。

3.2.2 圧電型加速度センサ

圧電型加速度センサは加速度の変化が生じないと加速度を検出しない、つまり静加速度は検出できず、動加速度のみを検出する特性がある。構造は図4に示すように圧電セラミックと金属板を接合し、金属板におもりが接合され外周を支持した構造である⁹⁾。加速度Fが矢印の方向に働いた場合、圧電セラミックは点線部のように変形する。その時の応力は加速度に比例し、圧電セラミックに圧電効果が生じることで応力に比例した電圧が発生する。このように圧電型加速度センサは圧電セラミックに発生する電圧量をもとに、加速度の変化を検出する原理であるため、動加速度のみ検出する。しかし、検出精度はおもりの重量に依存しているためMEMS化が困難であり、小型のものは感度及び周波数が静電容量型より劣る。航空機向けなどで用いられている慣性航法は圧電型加速度センサを採用しているが、これらは非常に高価かつ大型で重量の大きいものであるため、本研究で提案している人が手軽に装着して利用するシステムへの適応は困難であると考えられる。そこで本研究では、比較的小型の圧電型加速度センサを動加速度の検出精度の向上させるためのみに用いる。

表 1: ハードウェア仕様
Table 1: Hardware specifications

MCU	プログラム領域 :16kByte RAM :512Byte EEPROM :512Byte
センサ検知感度	静電容量型 :± 2G/± 6G 圧電型 :± 4G
A/D コンバータ 電源	Analog Devices 社製 AD7798 DC5~12V USB:5V
インタフェース 外形寸法	USB(シリアルポート) 50.3mm × 54.6mm

4 実装

提案手法を評価するため、2つの加速度センサから加速度を取得し、3.1節で述べたフィルタ処理と距離算出を行う実験システムを実装した。本研究では加速度を取得するためのハードウェアを実装し、ハードウェアで取得した加速度を計算するためのソフトウェアをパソコン側に実装した。

4.1 要求仕様

ハードウェアとしては、静電容量型と圧電型の加速度センサを搭載し、それぞれのセンサで検出された加速度をデジタルデータで出力するためのA/Dコンバータが必要である。さらに、取得したデータをパソコンに送信するためのインタフェースが必要となる。また外形の寸法は実験者が身につけることを考慮すると、10cm × 10cm程度であることが望ましい。

パソコンに実装するソフトウェアに関しては、ハードウェア側から加速度データを取得し、計算処理を行えることが必要となる。また、3.1節で説明した動加速度検出のための圧電型加速度センサに用いる閾値を設定できる必要がある。

4.2 計測システム設計と実装

要求仕様を基に、静電容量型と圧電型の加速度を検出するための計測システムを設計と実装した。設計したハードウェアの仕様を表1に示す。また、実装したハードウェアの回路構成を図5に示す。MCUにはATMEL社製AVR AT90USB162を採用した。このMCUは、プログラム領域を16kByte、内部EEPROMを512Byteもち、USBクライアント機能を内蔵している。電源は外部電源とUSB通信切り替えが可能な設計にした。静電容量型加速度センサにはST Microelectronics社製のLIS3L06ALを

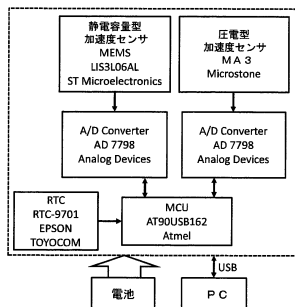


図 5: 計測システム回路構成

Fig. 5: System structure of prototype

表 2: 加速度センサの比較

Table 2: Specification of sensors

	静電型センサ	圧電型センサ
感度 [mV/g]	600(2g)/200(6g)	500 ± 10%
0g 電位 [V]	1.5	2.5 ± 0.2
応答周波数 [Hz]	1500	0.8~1000

採用した. この加速度センサは同じ価格帯のものと比較して, 外部温度に感度が影響されにくく, 加速度ノイズ強度も小さい特徴がある. また, 応答周波数も 1500[Hz] と比較的高いため, 慣性航法の問題となるノイズの蓄積を抑えるために有効であると考へた. 圧電型加速度センサは Microstone 社製の MA3-04Ac を用いた. MA3-04Ac の検出範囲は ± 4G, 検知感度が 50 ± 10%(mV/G) である. 採用した静電容量型と圧電型の加速度センサの比較を表 2 に示す. また, A/D コンバータは Analog Devices 社製の AD7798 を採用した. 最大 500Hz のサンプリングで動作可能であり, 3 チャンネル差動アナログ MUX, バッファ・ゲイン調整, SPI 通信によるデジタルインターフェースを内蔵している. ただし, 連続 A/D 変換においては, 3 軸加速度センサの取得は 40Hz が最大となるため, 本システムでは各軸を 40Hz でサンプリングする. 内部通信は MCU から A/D コンバータ及び, RTC へは SPI ポートを用いて行う. パソコン側とのインターフェースは USB で行う. なお, デバイスのサイズは約 5cm 四方となっている.

評価実験を行うため, これまでに述べたデバイスを内部に取り付けた図 6 に示す計測器を実装した.

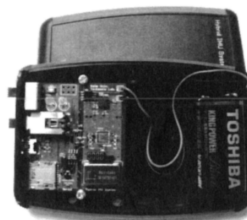


図 6: 計測器

Fig. 6: Prototype device

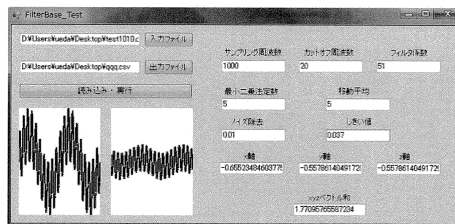


図 7: フィルタ処理システム

Fig. 7: Filter processing system

4.3 フィルタ処理

ハードウェア側で取得した加速度データを読み込み, 提案手法によるフィルタ処理を実行できる図 7 に示すシステムを Visual C# 2005 を用いて実装した. 本システムは提案手法の圧電型加速度センサに設定する閾値の設定や 3.1 節で述べたそれぞれのフィルタ処理がパラメータを変更して計算できる.

5 評価と考察

本研究では, 図 6 に示す計測装置を人に取り付け, 評価実験を行った. 人への取り付け位置は, 腰周辺にベルトで挟み込む形で取り付けた. 実験は次の 4 つについて行い, それぞれ 10 回のデータを取得した.

- 通常歩行 (直線 50m)
- 早歩き (直線 50m)
- 走行 (直線 50m)
- 4 階建て校舎の階段上り下り (水平方向 35m)

各実験において, 進行方向の加速度を求め, 3.1 節で述べた提案手法を用いて移動距離の計算を行う. また, 実験の初めにそれぞれ予備実験を行い, 取得した加速度データより, 圧電型加速度センサに設定する閾値を動作ごとに決定した. 提案手法の比較対象として, 静電容量型加速度センサに, ハイパスフィルタ処理を行い簡単な重力加速度とノイズ除

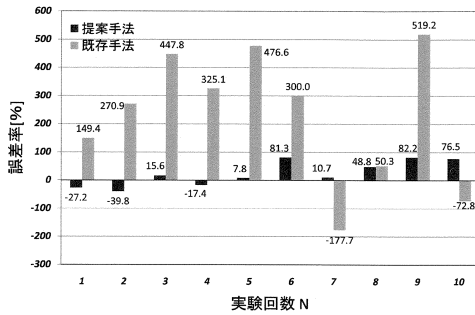


図 8: 通常歩行の推定誤差比較

Fig. 8: Estimation errors in normal walking

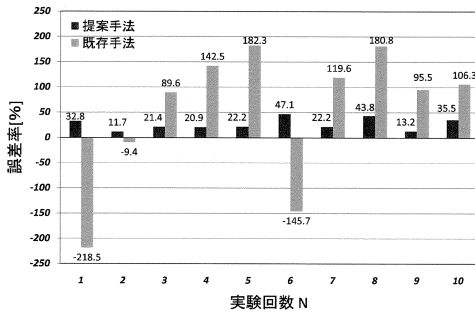


図 9: 早歩き of 推定誤差比較

Fig. 9: Estimation errors in fast walking

去を行った加速度を積分した移動距離を求める手法を実装した。

実験から求めた、移動距離と実際の距離と比較し、それぞれの誤差率を図 8, 9, 10, 11 に示す。提案手法では、歩行が平均 40.7% の誤差、早歩きが平均 27.1% の誤差、走行が平均 23.1% の誤差、階段の上り下りが平均 38.6% の誤差であった。歩行と早歩き、走行では、提案手法を用いることで誤差率が軽減されており、分散も小さくなっていることがわかる。歩行の方が早歩きや走行と比べて誤差率が大きくなっている原因は、一步、一步の速度の変動が比較的大きいことが考えられる。また、階段の上り下りに関しては、既存手法では水平方向の移動であっても重力加速度の影響で、非常に大きな誤差が算出されているが、提案手法を用いることによって誤差率の軽減が確認できた。しかし、状況により誤差が大きくなってしまいうることもわかってきた。これは人の動きのすべての衝撃を加速度センサが検出できていないことによる問題があると考えられる。

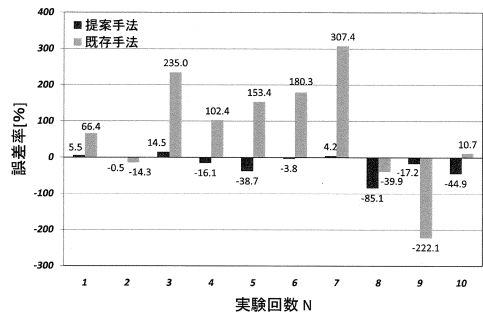


図 10: 走行の推定誤差比較

Fig. 10: Estimation errors in running

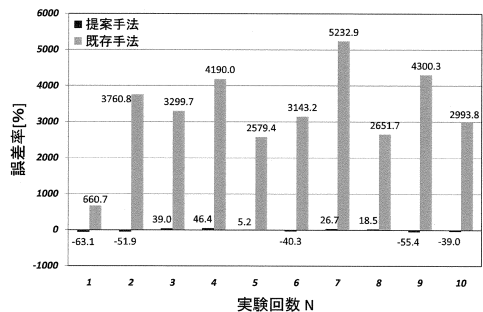


図 11: 階段運動の推定誤差比較

Fig. 11: Estimation errors in go up/down stairs

以上の結果より、筆者らが提案する圧電型加速度センサの加速度情報をフィルタ処理として用いる手法が、有効に働くことを確認した。一方、本実験では、それぞれの動作に対して最適な閾値を利用できることを前提として評価を行ったが、現実環境ではさまざまな動作が連続的に変化するという状況が起こりうるため、提案手法をそのままでは実環境に適用できない。そこで、圧電型加速度センサの値などから現在の状況を認識し、閾値を動的に変化させるアルゴリズムが必要となる。そのようなアルゴリズムの提案は今後の課題である。

6 まとめ

本研究では検出原理の異なる静電容量型と圧電型の加速度センサを組み合わせ、安価で計算量の少ない慣性航法の計算手法を提案した。静電容量型加速度センサの動加速度と静加速度を混合した加速度から、圧電型加速度センサを用いることで計算量が少なく動加速度成分を取り出し移動計算を行う慣性航法システムを実装し評価した。人の歩行、早歩き、

走行, 階段の上り下りについて評価した結果, 提案手法により測定誤差を軽減できることを確認した.

さらに, これまでに提案されている手法を, 計算コストが許す範囲で用いることで, さらに精度の良い慣性航法が実現できる. また, 評価実験ではそれぞれ最適な閾値を用いたが, 現実世界では閾値の選択はまだできていない. そのため今後の課題としては, 現実世界での実用に向けて, 5章で述べた閾値設定の自動化や, 他の手法との組合せについて検討を行う.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金(特定領域研究)「情報爆発のための装着型入出力デバイスを用いた情報操作方式」(課題番号: 19024056)によるものである. ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 1) 上坂大輔, 岩本健嗣, 村松茂樹, 西山 智: “携帯電話における加速度・地磁気センサを用いた位置取得システム,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008), Vol. 2008, pp. 761-767, 2008.
- 2) 興梠正克, 蔵田武志: “ウェアラブルカメラと慣性センサ群のデータ統合に基づくパーソナルポジショニング,” 第12回複合現実感研究会, No. 180, pp. 67-72, 2003.
- 3) 佐川貢一, 煤孫光俊, 大瀧保明, 猪岡 光: “足爪先加速度積分による歩行経路の3次元無拘束計測,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 6, pp. 635-641, 2004.
- 4) 河口信夫: “Locky.jp: 無線 LAN を用いた位置推定とその応用,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 107, No. 161, pp. 1-4, 2007.
- 5) PlaceEngine, <http://www.placeengine.com/>.
- 6) L. Naimark: “Circular Data Matrix Fiducial System and Robust Image Processing for a Wearable Vision-Inertial Self-Tracker,” Proceedings of Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR' 02), pp. 27-36, 2002.
- 7) 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和: “不可視マーカを用いたウェアラブル AR システムの実環境における実証実験,” 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, No. 104(524), pp. 7-12, 2004.
- 8) N. B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan: “The Cricket Location- Support System,” Proceedings of 6th Annual ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), pp. 32-43, 2000.
- 9) MicroStone, <http://www.microstone.co.jp/>.